

PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE *ARUNDO DONAX L.*, UN CULTIVO PERENNE DE ALTO POTENCIAL ENERGÉTICO EN ARGENTINA

PRODUCTION OF BIOMETHANE FROM ARUNDO DONAX L., A PERENNIAL CROP WITH HIGH ENERGY POTENTIAL IN ARGENTINA

Verónica Córdoba ¹, Romina Cardoso ², Alejandra Manzur ³, Estela Santalla ⁴, Laura Lazaro ⁵

Recibido: 23/3/2023 y Aceptado: 24/5/2023

ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (56 - 72)

ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Conscious Design de Unsplash.

1 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería
CONICET. Argentina vcordoba@fio.unicen.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0001-6601-7452>

2 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería.
Argentina rominapaolacardoso@gmail.com

3 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería
Argentina amanzur@fio.unicen.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-9660-1470>

4 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería.
Argentina estela.santalla@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6631-2267>

5 CIISAS, Facultad de Agronomía. Argentina
llazaro@faa.unicen.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-6160-783X>

RESUMEN

Arundo donax L. es un cultivo perenne, que ha demostrado, un buen rendimiento de biomasa por hectárea y su potencialidad como biocombustible sólido. En este trabajo se evalúa la producción de biometano a partir de la digestión anaeróbica de la biomasa de *Arundo donax L.*, ensilado y sin ensilar, en condiciones mesofílicas en régimen batch y a escala laboratorio y utilizando una relación sustrato/inoculo de 3/1 en términos de sólidos volátiles, con la finalidad de cuantificar su potencial energético para sustituir al silaje de maíz en las plantas de biogás. Se realizó la caracterización físico-química de muestras frescas y ensiladas. La estructura de *Arundo donax* reveló 34.4 y 10.8% bs de α -celulosa y lignina, respectivamente y una relación C/N entre 15.2 y 18.2 (87% inferior a silaje de maíz). La producción de biometano resultó 276 NmL CH₄/g SV, 11% inferior al silaje de maíz, sin observar efectos significativos de los tratamientos de ensilado. Considerando el rendimiento por hectárea obtenido para *Arundo* en

Argentina, la productividad energética alcanzaría 5,850 Nm³ CH₄/ha, superior al de maíz (4,423 Nm³ CH₄/ha). Estos valores resultan promisorios para considerar a esta biomasa como cultivo con capacidad potencial para reemplazar al maíz en un escenario sostenible de transición energética, debido al bajo requerimiento de nutrientes y recursos, lo que permitiría liberar tierras agrícolas para la generación de productos de mayor valor agregado.

Palabras clave: Biomosas, Biogás, Digestión anaerobia, Ensilado, Recursos energéticos renovables.

ABSTRACT

Arundo donax L. is a perennial crop, which has demonstrated good biomass yield per hectare and its potential as a solid biofuel. In this work, the production of biomethane under anaerobic digestion of *Arundo donax L.*, both ensiled and fresh, was evaluated under mesophilic conditions in a batch regime and on a laboratory scale, in order to quantify its energy potential to replace corn silage in biogas plants. The physical-chemical characterization of fresh and ensiled samples was carried out. The structure of *Arundo donax* revealed 34.4 and 10.8% bs of α -cellulose and lignin, respectively, and a C/N ratio between 15.2 and 18.2 (87% lower than corn silage). Biomethane production was 276 NmL CH₄/g SV, 11% lower than corn silage, without observing significant effects of silage treatments. Considering the yield per hectare obtained for *Arundo* in Argentina, energy productivity would reach 5,850 Nm³ CH₄/ha, higher than that of corn (4,423 Nm³ CH₄/ha). These values are promising to consider this biomass as a crop with potential capacity to replace corn in a sustainable scenario of energy transition, due to the low requirement of nutrients and resources, which allows freeing agricultural land for the generation of products with higher added value.

Keywords: Biomass, Biogas, Anaerobic digestion, Silage, Renewable energy resources.

INTRODUCCIÓN

La producción de bioenergía a partir de biomasas es una realidad creciente en Argentina, que surge como resultado de la promulgación de la Ley 27.191 en el año 2015, la cual fomenta el uso de fuentes renovables de energía. El actual modelo energético basado en el consumo de combustibles fósiles, refleja un aumento creciente de la demanda de energía, cuyas emisiones agudizan los procesos de calentamiento global (Nogar et al., 2021).

La producción de biogás por digestión anaeróbica (DA) es una alternativa de generación de energía renovable que posibilita el aprovechamiento de residuos agroindustriales, residenciales y sustratos diversos para generar energía térmica y/o eléctrica (Liebetrau et al., 2020); esta tecnología contribuye, además, a resolver problemas críticos de la sociedad actual, como es la gestión de los residuos, la mitigación de los impactos negativos sobre los ecosistemas y la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEIs), cuya acumulación genera los efectos del cambio climático (Scott y Blanchard, 2021). En el marco de la promoción de electricidad a partir de energías renovables, se ha incrementado en Argentina la instalación de plantas de bioenergía a partir de biogás (FAO, 2019) para la producción de electricidad, principalmente asociadas a sistemas agropecuarios intensivos (feedlot, tambos, criaderos de cerdos o pollos) que gestionan parte de los desechos de la producción mediante digestión anaeróbica. Estas plantas requieren, para cumplir con la potencia contratada, alcanzar una producción eficiente de metano, lo que se logra aportando suministros adicionales, tales como silaje de maíz o sorgo (Veluchamy et al., 2019). Esta situación ha provocado que el precio de la energía generada a partir de biogás tenga una fuerte dependencia del precio de este *commodity*, lo cual resulta poco favorable, no sólo desde el punto de vista económico, sino

que desde el punto de vista ambiental, también compromete la sostenibilidad del sistema, ya que la cadena del maíz ofrece mayor potencial de desarrollo para la producción de alimentos y productos de alto valor agregado a través de su utilización en procesos biotecnológicos (Bisang y Trigo, 2017).


Arundo donax L. (AD) comúnmente conocida como Caña de Castilla, es una biomasa lignocelulósica perenne, de cosecha anual, que puede crecer en una amplia variedad de suelos y que además presenta un balance de energía positivo y excelente productividad por hectárea (Pompeiano et al., 2013). Características, tales como alta producción de biomasa, rusticidad y adaptación a ambientes de capacidad limitada (Falasca et al., 2011), resultan altamente favorables para evitar el uso de superficie agrícola de elevada calidad para la producción de bioenergía. Imporzano et al. (2018) plantearon el desafío de utilizar AD para reemplazar 47,000 ha de cultivo de maíz destinadas a la producción de energía en la región lombarda (Italia) y liberarlas para la producción de alimentos, demostrando, a partir del análisis de ciclo de vida, que el modelo basado en la utilización de AD reduce entre 17 y 33% las categorías de impacto vinculadas a la gestión de nutrientes como eutrofización, acidificación y generación de material particulado. Esto ha permitido que varios autores como Baldini et al., (2017) y Thomsen et al., (2014), profundicen en el estudio del uso de AD como cultivo energético en la región mediterránea. En Argentina, Rodríguez et al. (2021) han llevado a cabo los primeros estudios agronómicos en el sudeste de la región pampeana, y a nivel tecnológico, se ha analizado su potencial energético por vía seca para la producción de energía térmica (Córdoba, Manzur, et al., 2022a, 2022b). Sin embargo, la utilización de AD como sustrato para la producción de biogás requiere analizar el efecto que algunas variables, vinculadas al cultivo y su manejo, ejercen sobre la composición de la biomasa. En este sentido, Pirozzi et al., (2015) observaron que las condiciones de cultivo influyen sobre los

componentes estructurales de la biomasa. En condiciones de irrigación y altas temperaturas la biomasa de AD presentó un incremento del contenido de celulosa del 8.5% frente a condiciones de secano y bajas temperaturas ambientales. La celulosa es reconocida como un sustrato de alto potencial, y bajo digestión anaeróbica su potencial de producción de biometano se encuentra entre el 80 y 100% de su máximo teórico (Holliger et al., 2016; Kreuger et al., 2011; Triolo et al., 2012). Sin embargo, su biodisponibilidad puede ser reducida principalmente debido a la acumulación de lignina durante su ciclo de desarrollo, siendo éste el factor limitante más importante en la conversión anaeróbica de materiales lignocelulósicos (Monlau et al., 2013; Triolo et al., 2011). En este sentido, Ragolini et al., (2014) encontraron que el rendimiento de metano por hectárea de AD de primer corte excede en hasta un 35% el metano producido a partir de una sola cosecha en la madurez del cultivo, indicando que las modificaciones de la cristalinidad de la celulosa, las propiedades fisicoquímicas de la hemicelulosa, la polimerización de la lignina y la variación de la composición a lo largo del ciclo del cultivo son factores clave que influyen en la disponibilidad de carbohidratos estructurales y no estructurales para el proceso de digestión anaeróbica.

Otro de los puntos a resolver es la necesidad de las plantas generadoras de biogás de disponer de una alimentación constante de biomasa a lo largo del año, por lo que, en general, se recurre al proceso de ensilado para asegurar su conservación. Actualmente, es la práctica utilizada para cultivos como maíz, o sorgo, pero en el caso de AD, sus características, tales como alta proporción de carbohidratos estructurales y, ausencia de granos que aporten carbohidratos solubles y azúcares fermentables, dificultaría la capacidad de esta biomasa para alcanzar una óptima calidad del silaje (Barbanti, 2014). La utilización de inoculantes a base de bacterias ácido lácticas podría acelerar los procesos fermentativos y un rápido descenso del pH en el

silaje, lo que mejoraría su conservación, tal como ocurre en silos de especies forrajeras (Gallardo, 2018). A fin de analizar este punto, Corno et al. (2016) avanzaron en el estudio de los procesos de ensilados y encontraron que la producción de metano por hectárea del ensilado de AD en silo bolsa por 100 días fue de 22,183 Nm³/ha, resultando más eficiente que el ensilado en trinchera (21,468 Nm³ CH₄/ha). Estos valores, además, fueron superiores a los de otros cultivos energéticos como maíz (6,931 Nm³ CH₄/ha), sorgo (5,975 Nm³ CH₄/ha) o centeno (2,738 Nm³ CH₄/ha). Estos antecedentes constituyen herramientas que permiten avanzar sobre la utilización de AD con fines energéticos en Argentina.

En el presente trabajo se evaluó el potencial de producción de biometano de AD cultivado en la región centro de la provincia de Buenos Aires, a partir de muestras frescas y ensiladas con y sin inoculantes en base a bacterias lácticas. Estos resultados fueron comparados con los de un silaje de maíz, utilizado actualmente en una planta de biogás en funcionamiento en la región. Además, se estudió y modeló la cinética del proceso para determinar los parámetros que permitirán mejorar el proceso de producción de biometano de AD.



**El actual modelo energético
basado en el consumo de
combustibles fósiles, refleja un
aumento creciente de la demanda
de energía, cuyas emisiones
agudizan los procesos de
calentamiento global**

METODOLOGÍA

Muestras

Las muestras de AD provienen de un cultivo ubicado en la Chacra Experimental de la Facultad de Agronomía de la UNCPBA en Azul, provincia de Buenos Aires (36° 49' 41,4'' S; 59° 53' 11,6'' O; 147 s.n.m.). Este cultivo fue implantado en octubre de 2019 según se describe en Rodríguez et al., (2021), y las muestras utilizadas se corresponden con el primer corte del tercer ciclo anual del cultivo, corte realizado el 15 de diciembre de 2021, a los 80 días del inicio de brotación. Se tomaron alícuotas de 5 cañas cortadas al ras del suelo, provenientes de cuatro bloques experimentales. Sobre estas muestras se determinó el peso fresco y luego se procedió a su picado. Con las muestras de AD fresco (AD) se confeccionaron microsilos con (ADCI) y sin (ADSI) la aplicación de un inoculante comercial (*Silotrap Plus*), que contiene bacterias lácticas (*Lactobacillus plantarum* y *L. buchneri*) y *Pedicoccus acidilactici*, en dosis de 2 g/t de forraje verde. Los microsilos de alrededor de 2 kg cada uno fueron compactados a una

densidad 817 kg/m³ dentro de bolsas plásticas de 240 µm de espesor y cerrados herméticamente para evitar el ingreso de oxígeno, simulando el silaje a campo. Los silos se abrieron para su caracterización y análisis al cabo de 83 días. En forma comparativa se analizó una muestra de silaje de maíz (SM) proveniente de una planta de producción de biogás, ensilado durante un mes en trinchera, sin aditivos ni agua, y compactado con tractor.

La evaluación de la calidad del material previo y post ensilado con y sin inoculantes se realizó mediante la determinación de proteína bruta (%PB) (macro Kjeldahl, factor 6,25 según AOAC, 1998), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácido (FDA) (analizador de fibra Ankom 200, Ankom Technology, Fairport, NY, EEUU) y carbohidratos no estructurales solubles en agua (CNES), adaptado del Método de Antrona según Yemm y Willis, (1954). Sobre el material fresco y ensilado además se determinaron cualitativamente las características organolépticas olor, color y textura que califican la calidad del material ensilado como excelente, buena, regular y mala según Cárdenas Medina et al., (2004).

Figura 1: Muestras estudiadas para la determinación del potencial de biometano. De izq a der. AD, ADCI, ADSI y SM.



Fuente: Elaboración propia

Caracterización físico-química de las muestras

La caracterización físico-química de las muestras de AD, ADCI, ADSI y SM se realizó en términos del contenido de humedad, sólidos totales (ST) y materia volátil (SV), según norma ASTM, (1999); pH y alcalinidad (AT) según el método 6045D del compilado SW-846 (USEPA, 1995) y nitrógeno amoniacal (NA) según APHA (1999). La composición polimérica fue establecida en términos de á-celulosa y hemicelulosa según norma TAPPI T 203 (*Technical Association of Pulp and Paper Industry* - TAPPI, 1999). El contenido de lignina se determinó según la norma ASTM 1106 (ASTM, 1999). La composición elemental de los sustratos en términos de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre se determinó utilizando un equipo CHN628, *Sulphur Add-On Module* y *TruSpec Micro Oxygen Add-On Module Elemental Determinators* (LECO).

Determinación del potencial de biometano

El potencial de biometano (PBM) de las tres muestras de AD (Fig. 1) y SM, se estableció según la metodología propuesta por Holliger et al., (2016). Se utilizaron bioreactores batch de 500 mL de capacidad por triplicado, con una relación Inóculo/Sustrato en unidades de SV de 3/1, concentración de inóculo en el reactor de 25 g SV/L y 20% de espacio libre en el reactor, en condiciones mesofílicas (35°C±1) y en medio neutro. Se utilizó una solución de nutrientes según Aquino et al., (2007) con la finalidad de alcanzar un volumen final de mezcla de reacción de 400 mL. El seguimiento del proceso se realizó midiendo el volumen de CH₄ producido, utilizando un sistema de absorción de CO₂ mediante el burbujeo de biogás en una solución de NaOH 6 N y conexión a un sistema de desplazamiento según (Córdoba et al., 2022b). En paralelo se condujeron ensayos de un blanco de inóculo y de un control positivo (CP), que utiliza celulosa microcristalina (CAS 9004-34-6) como sustrato, control que permite verificar la actividad y calidad del inóculo. El ensayo finalizó cuando la producción diaria de metano resultó

inferior al 1% de la producción acumulada durante tres días consecutivos. El protocolo establece como parámetros de aceptación y rechazo de la prueba las siguientes condiciones, una desviación estándar relativa inferior al 5% para el blanco y el CP, e inferior al 10% para cada sustrato, y un PBM para el CP entre 352 y 414 NmL CH₄/g SV celulosa. Como inóculo se utilizaron lodos de planta depuradora, los cuales fueron previamente desgasificados y adaptados al sustrato, aplicando la metodología propuesta por Steinmetz et al., (2016). El inóculo presentó un contenido en SV de 0.5766 ± 0.0072 g/g, pH 7.60, AT de 4026±137mg CaCO₃/L y NA 744±45 mg/L. Estos parámetros se encuentran en el rango de lo establecido por Holliger et al., (2016) para asegurar un inóculo de calidad.

Cinética del proceso de digestión anaeróbica

El análisis de la cinética de un proceso biológico permite establecer la biodegradabilidad del sustrato en estudio, a la vez que brinda información que puede ser utilizada para el escalado del proceso. En este trabajo se utilizó el modelo de Primer Orden, el cual estima una constante de velocidad de producción de metano o tasa de desintegración de primer orden, k (d⁻¹) y el rendimiento máximo teórico de metano (NmL CH₄/g SV), según (1). Este modelo se basa en considerar que la disponibilidad de sustrato es el factor limitante y supone que la hidrólisis gobierna el proceso general (Li et al., 2015).

$$L(t) = L_0 (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

Donde $L(t)$ es la producción acumulada de metano (NmL CH₄/g SV) al tiempo t (h).

Análisis estadístico

El análisis del efecto del proceso de ensilado sobre el PBM en las muestras estudiadas se realizó mediante la prueba de ANOVA al 95% de confiabilidad ($\alpha = 0.05$), utilizando el *software Statgraphics Centurion XVI* (v.18.1.12).

Los parámetros del modelo cinético para cada sustrato se estimaron utilizando la herramienta *Curve Fitting Tool* de MATLAB® software (MathWork, versión R2017b), que provee los estadísticos correspondientes al coeficiente de determinación R^2 y a la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

RESULTADOS

Características de las biomásas

Las muestras utilizadas, que corresponden al primer corte del tercer ciclo de producción, presentaron un rendimiento medio en materia seca de 11.98 ± 0.59 t/ha. Es importante destacar que al final de la estación de crecimiento, en junio, se realizó un segundo corte del expe-

rimento que aportó 8.6 ± 1.10 t/ha adicionales, siendo la producción anual de biomasa de 20.31 ± 1.74 t/ha (datos no presentados).

La Tabla 1 detalla las características de calidad de las biomásas estudiadas. El contenido de humedad inicial de las muestras resultó 74.9% (b.h.) valor sensiblemente superior al mínimo recomendado para obtener silajes de óptimas condiciones de conservación (65%). El elevado contenido de humedad pudo haber sido responsable de la generación de lixiviados, además de haber favorecido fermentaciones de tipo butírica en lugar de láctica, lo que se verifica en las características organolépticas, de regular a mala, así como en el descenso en el contenido de los carbohidratos solubles y en el aumento en la proporción de FDA (Tabla 1), y en un pH no suficientemente ácido en las muestras (Tabla 2).

Tabla 1. Evaluación de la calidad de las muestras

Biomasa	% PB	% FDN	% FDA	% CNEs
AD	8.23 ± 2.29^a	74.10 ± 0.57^a	43.43 ± 1.29^a	2.19 ± 0.44^b
AD _{SI}	7.61 ± 1.96^a	69.57 ± 1.07^a	46.26 ± 2.93^b	0.81 ± 0.21^a
AD _{CI}	7.91 ± 1.20^a	70.67 ± 1.09^a	44.31 ± 1.23^b	0.96 ± 0.09^a
<i>p valor</i>	<i>0.670</i>	<i>0.090</i>	<i>0.028</i>	<i>0.006</i>

*Letras diferentes dentro de columnas indican diferencias significativas en el test de comparación de medias

De la Tabla 1 se puede observar un leve incremento del 2.0% y del 6.5% en el contenido de FDA y un descenso del 55.9% y 62.8% en los CNEs en el material ensilado con y sin inóculo respecto del fresco. En ninguna de las variables se observaron efectos atribuibles a la inoculación biológica. La concentración de proteína bruta de la biomasa resultó menor al valor estimado por Kering et al., (2012) para estadios iniciales del cultivo (10.3 %). Otros autores, como Mantineo et al., (2009) sólo reportan el contenido de proteínas al final de la estación de crecimiento,

que para el tercer año de cultivo resultó entre 1.5 y 1.6, dependiendo del nivel de fertilización nitrogenada utilizado, valores significativamente inferiores a los encontrados para AD de primer corte al tercer año de cultivo en nuestra región. Por lo expuesto, si bien el corte en estados tempranos presenta, según la bibliografía, ventajas como resultado de una menor proporción de lignina, se requeriría un secado previo del material para llegar a concentraciones de materia seca más adecuadas (alrededor del 40%), lo que mejoraría la conservación del material ensilado.

En este sentido el aporte de bacterias lácticas mediante el uso de un inoculante comercial no mostró diferencias significativas respecto del tratamiento sin inocular (Tabla 1). Kleinschmit & Kung L, (2006) sugieren que cada cultivo en particular requeriría inoculantes con bacterias adaptadas al mismo. El inoculante comercial utilizado contiene bacterias que contribuyen a lograr silos con bajo pH y alta estabilidad en cultivos de maíz y sorgo. Como no existen en el mercado argentino inoculantes recomendados para silos de AD y ésta es una de las primeras evaluaciones de esta técnica en el país, fue utilizado un inoculante para gramíneas de verano, lo más semejante a AD de las opciones disponibles en el mercado. La baja especificidad podría explicar en parte la falta de respuesta al mismo.

Las características físico-químicas de las muestras utilizadas para determinar el PBM se describen en la Tabla 2. Se observa una disminución significativa entre 35 y 36% en el contenido de ST de ADSI y ADCI, respecto a AD por efecto del proceso de ensilado, resultados relacionados con la generación de lixiviados como consecuencia del exceso de humedad de la biomasa

original. Tendencia similar fue observada por Corno et al., (2016) quienes reportaron reducciones del orden del 15-16% y por Baldini et al., (2017) de entre 0.2 y 5.6%, dependiendo de la fecha de corte de la biomasa.

Respecto al pH, si bien se detectó una leve oscilación por efecto del ensilado, no se observó la reducción reportada por Corno et al., (2016) como consecuencia de la acumulación de ácidos grasos volátiles. Respecto al contenido de nitrógeno amoniacal, se detectó en ambos ensilados que la concentración aumentó de 0.06 ± 0.00 mg/g a 0.56 ± 0.02 y 0.83 ± 0.01 mg/g para ADCI y ADSI respectivamente, lo que representa aumentos superiores al 800% respecto a la muestra fresca. Estos incrementos pueden ser efecto de la ruptura de las proteínas durante el proceso de ensilado, resultado de una fermentación restrictiva, tal como han reportado Baldini et al., (2017) para AD y *Miscanthus*; dando un indicio de que los silos obtenidos fueron de baja calidad.

Según Chew et al., (2021), las condiciones óptimas de pH, para una adecuada hidrólisis durante un proceso anaeróbico de tipo mesofílico, se dan en un rango de pH entre 5 y 7, con lo cual los valores medidos para las muestras estudiadas deberían favorecer una adecuada evolución del proceso. Sin embargo, según Gerardi (2003) una actividad enzimática aceptable que promueva la formación de bacterias metanogénicas no ocurre por debajo de pH 6.2, siendo el rango óptimo entre 6.8 y 7.2. Estas condiciones indicarían que las muestras de ADCI y SM deberían presentar una buena *performance* en la producción de biometano.

Se observó un aumento significativo de la AT de las muestras frescas por acción del ensilado, con incrementos de 57.3 y 65.8% para ADCI y ADSI respectivamente. Todos los valores de AT de AD fueron significativamente superiores a SM, lo que resulta en muestras con una mayor capacidad *buffer*, lo que asegurará un mayor control de pH del reactor.

**Este escenario posiblemente
permitiría liberar tierras agrícolas
para la generación de productos
de mayor valor agregado que
aporten desarrollo e innovación a
la bioeconomía nacional.**

Tabla 2. Caracterización físico-química de las muestras de biomásas utilizadas en los ensayos de PBM.

Parámetro	AD	AD _{Cl}	AD _{SI}	SM	p-value
ST (% bh)	25.01 ± 0.49 ^b	15.99 ± 0.38 ^a	16.23 ± 0.51 ^a	42.98 ± 0.18 ^c	0.0000
SV (% bs)	88.42 ± 2.20 ^a	88.62 ± 0.14 ^a	87.73 ± 0.49 ^a	95.16 ± 0.36 ^b	0.0039
pH	5.74 ± 0.03 ^b	6.89 ± 0.02 ^c	5.31 ± 0.02 ^a	7.84 ± 0.04 ^d	0.0000
AT (mgCaCO ₃ /L)	654.22 ± 39.99 ^b	1028.77 ± 18.30 ^c	1084.71 ± 4.18 ^c	450.61 ± 10.46 ^a	0.0001
NA (mgNH ₃ ⁺ /g)	0.06 ± 0.00 ^a	0.56 ± 0.02 ^b	0.83 ± 0.01 ^b	0.63 ± 0.03 ^c	0.0000
α celulosa (% bs)	34.4 ± 2.3 ^b	33 ± 1.5 ^b	39.5 ± 3.5 ^b	20.5 ± 0.6 ^a	0.0154
Hemicelulosa (% bs)	19.0 ± 1.2 ^b	16.9 ± 0.1 ^{ab}	18.0 ± 0.5 ^b	14.1 ± 0.7 ^a	0.0374
Lignina (% bs)	10.8 ± 0.3 ^d	8.4 ± 0.8 ^b	8.8 ± 0.3 ^{bc}	5.7 ± 0.4 ^a	0.0101
% C	40.07 ± 0.80 ^b	36.2 ± 0.24 ^a	36.0 ± 1.29 ^a	43.47 ± 0.02 ^c	0.0063
% N	2.2 ± 0.03 ^c	2.38 ± 0.03 ^d	2.10 ± 0.02 ^b	1.38 ± 0.01 ^a	0.0000
% H	5.09 ± 0.01 ^b	4.77 ± 0.02 ^a	4.89 ± 0.12 ^{ab}	6.12 ± 0.09 ^c	0.0009
% S	0.13 ± 0.03 ^a	0.16 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.0 ^a	ND	0.3024
C/N	18.19 ± 0.06 ^b	15.23 ± 0.10 ^a	17.11 ± 0.42 ^b	31.53 ± 0.30 ^d	0.0000

*Valores seguidos por la misma letra en la misma línea no presentan diferencias significativas a p-value <0.05. bs: Base seca. ND: no detectado

Respecto a la composición estructural, AD presenta mayor porcentaje de cada uno de los polímeros que SM. Respecto a α-celulosa, los valores superaron entre 40.4 y 48.1% al contenido en SM; en hemicelulosa entre 16.5 y 25.8% y en lignina entre 31.9 y 47.1%. Estas características podrían indicar una mayor resistencia de AD a la degradación de las estructuras para la producción de metano ya que la lignina actúa como barrera al resto de los constituyentes, impidiendo su degradación (Thomsen et al., 2014). Confirmando la influencia que las condiciones del cultivo ejercen sobre la composición de AD, se han encontrado en la literatura (Pirozzi et al., 2015; Thomsen et al., 2014) porcentajes de celulosa entre 20,7% y 46,2%, de hemicelulosa entre 17.7 y 23.5% y de lignina entre 16.2 y 25.4% para muestras de AD bajo diferentes condiciones

de cultivo, fertilización, riego y secado. Las muestras estudiadas en este trabajo presentaron contenidos de celulosa y hemicelulosa dentro de los rangos encontrados en la literatura, aunque el porcentaje de lignina resultó significativamente inferior, lo que ofrece una ventaja adicional para la producción de biometano.

Respecto al efecto del ensilado sobre la composición estructural, se observó que el contenido de celulosa permaneció prácticamente inalterado por la fermentación (diferencias no significativas para α-celulosa), con leve reducción del contenido de hemicelulosa (11% y 5%) aunque no significativa. Este resultado está de acuerdo con Webster, (1992) quien confirma que la hemicelulosa se degrada más fácilmente que la celulosa durante el ensilado y con los resultados

reportados por Baldini et al., (2017), quienes reportan que la hemicelulosa en el maíz se redujo en aproximadamente un 10.1% después del ensilaje. Respecto al porcentaje de lignina, el proceso de ensilado disminuyó 22.3% y 18.6% el contenido en ADCI y ADSI respectivamente, ambos estadísticamente diferentes a la muestra fresca, aunque resultando superiores a SM.

Por su parte, la relación C/N también presenta diferencias significativas entre los valores obtenidos para AD y SM, lo que *a priori* indica menor cantidad de carbono disponible para la producción de biogás. La relación C/N mostró leves disminuciones por efecto del ensilado en AD, tal como observaron Baldini et al. (2017) quienes reportaron reducciones de 0.8 y 15.9% para primer y segundo corte respectivamente. Los valores de C/N obtenidos para AD en el presente trabajo resultaron significativamente inferiores a los reportados por Di Girolamo et al. (2013) de 56 y por Baldini et al., (2017) de 50 y 122 para AD de primer y segundo corte respectivamente.

Potencial de biometano

Luego de aproximadamente 40 días de fermentación anaeróbica, el PBM de AD resultó 275.8 NmL CH₄/g SV, valor mayor al reportado por Di Girolamo et al., (2013) que obtuvo 250 NmL CH₄/g SV cuando trabajó con muestras de AD de primer corte o los obtenidos por Thomsen et al., (2014) quien reportó 178 NmL CH₄/g SV para muestras de AD

frescas. Por su parte, Ragaglini et al., (2014) reportaron PBM para AD fresco de 319.5 NL/kg SV correspondiente al primer corte mientras que Corno et al., (2016) obtuvieron rendimientos de 374 a 380 Nm³CH₄/t SV para cañas de AD frescas.

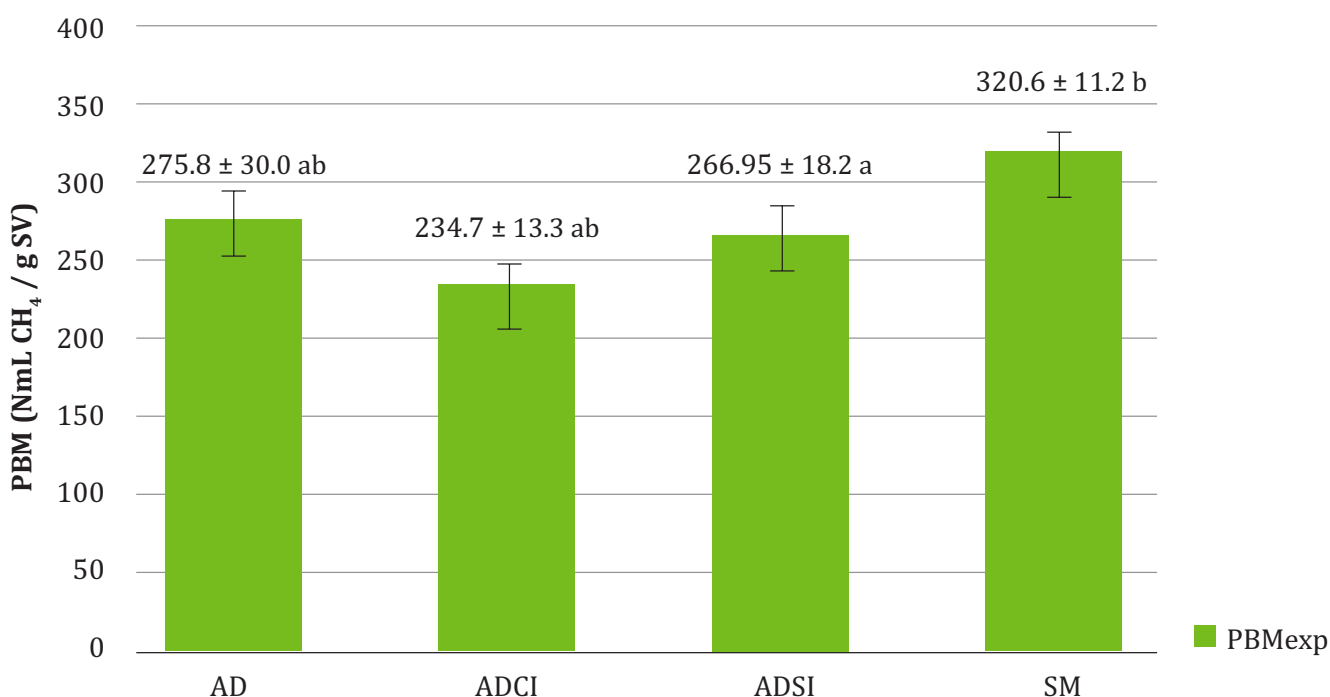
Respecto al efecto del ensilado, las diferencias entre los valores promedio (triplicados) del PBM para AD no resultaron significativamente diferentes ($p < 0.05$) observando la menor producción (234.7 NmL CH₄/g SV) en ADCI. El PBM resultó 14.9 y 3.2% inferior en ADCI y ADSI respectivamente en relación al valor obtenido para AD fresco, siendo a su vez este valor 14% menor a SM. Corno et al., (2016) también reportaron disminuciones en el PBM de 20.1 y 7.6% cuando evaluaron el efecto de ensilados de AD en trinchera y en silo bolsa respectivamente. Baldini et al., (2017) reportaron valores de PBM para muestras de AD ensiladas de 148.1 y 169.7 NmL CH₄/g SV, aproximadamente 42% inferior al PBM de AD fresco analizado en este trabajo.

Debido a la necesidad de las plantas de biogás de disponer de alimentación continua, y a que las plantaciones de AD solo pueden presentar dos cortes anuales, el proceso de ensilado resulta necesario para garantizar la disponibilidad de biomasa. Los resultados preliminares muestran que la estructura de AD ha sido resistente a la acción de las bacterias lácticas y, por lo tanto, no estaría afectando su PBM, por lo que AD podría ser utilizado directamente en el digestor, previo picado del material.



Foto de Nirnjan Photographs de Unsplash.

Figura 2. PBM predicho y experimental de las muestras estudiadas.



Valores del PBMexp con la misma letra no presentan diferencias significativas a p-value <0,05.

Los valores de PBM obtenidos son altamente promisorios, considerando que esta herbácea perenne alcanza su máxima productividad de materia seca aproximadamente luego de 4-5 años desde su implantación y se mantiene durante un ciclo de vida de aproximadamente 15 a 20 años (Webster et al., 2016). Además, basado en la revisión literaria llevada a cabo por Jámor & Török, (2019), este cultivo presenta bajos costos de mantenimientos una vez implantado. En particular, los mayores costos se dan durante el primer año y están relacionados con la implantación, de ahí en adelante estos se reducen a la fertilización, que debe realizarse cada 3 o 4 años. El costo de fertilización es significativamente menor que en el cultivo de maíz, debido a los bajos requerimientos de nitrógeno de la especie, 3 kg N/t MS (Christou et al., 2018) versus 11 kgN/t MS en maíz (Andrade, 2023). Jámor & Török, (2019) además, mencionan que al aplicar la metodología de costo del ciclo de

vida se obtuvo para AD en Europa un costo de la materia seca de 65 EUR/t mientras que para otros cultivos biomásicos perennes como Miscanthus o Panicum virgatum los costos se ubican entre 65 y 80 EUR/t.

Los resultados de productividad de AD obtenidos a partir de los primeros estudios agronómicos realizados en el centro de la provincia de Buenos Aires, mostraron un rendimiento de biomasa promedio 23.8 ± 3.5 t MS/ha, medido al tercer año desde su implantación en condiciones de secano, con una capacidad potencial (riego y fertilización) de hasta 38.6 ± 2.4 t MS/ha, lo que, en base al rendimiento promedio, daría una productividad de metano, una vez alcanzada la madurez del cultivo de $5,850$ Nm³/ha. Productividad superior a la obtenida por maíz de $4,423$ Nm³ CH₄/ha, considerando una producción de biomasa anual de 15.33 t/ha, obtenida para nuestra región a partir de un rendimiento

en grano de maíz según las estadísticas de la Dirección Nacional de Agricultura (Dirección Nacional de Agricultura, 2023) de 6.9 t/ha, y considerando un índice de cosecha (Rendimiento grano/Biomasa total) de 0.45 (Andrade, 2023) y un potencial experimental de 320 NmL CH₄/g SV. Los valores aquí obtenidos para AD se encuentran en el orden de los reportado por otros autores para diferentes zonas de Italia: Baldini et al., (2017) reportó rendimientos de metano de 5,522 m³ CH₄/ha para maíz, y de 2,647 m³ CH₄/ha para AD ensilado, Ragolini et al., (2014) por su parte informó una productividad de 9,580 Nm³ CH₄/ha para AD de primer corte, resultando superior a maíz (6,750 Nm³ CH₄/ha), obtenido a partir de un rendimiento de materia seca de 20 t/ha, mientras que Schievano et al., (2012) trabajando con AD de primer corte encontró rendimientos de metano entre 7,170 y 11,280 Nm³/ha.

Cinética de la digestión anaeróbica de AD

En la Tabla 3 se detallan los parámetros cinéticos obtenidos al modelar los datos experimentales según la Ec. (1), la cual que representa un mecanismo de degradación de primer orden controlado por la etapa de hidrólisis de la biomasa. Los resultados del rendimiento máximo teórico de metano, L₀, se corresponden con los valores experimentales obtenidos (Figura 2) con diferencias máximas de 33% entre SM y AD. No se observaron diferencias significativas en la velocidad de producción de metano para ninguna de las muestras estudiadas, lo que indica que las biomásas tienen un comportamiento similar durante el proceso mesofílico sin efecto del proceso de ensilado. SM mostró un valor de L₀ significativamente superior a AD pero en términos de velocidad de degradación (k) para producir metano no se observaron diferencias significativas entre las biomásas estudiadas.

Tabla 3: Parámetros cinéticos y estadísticos del ajuste del modelo cinético de primer orden aplicado para la producción de metano de AD y SM.

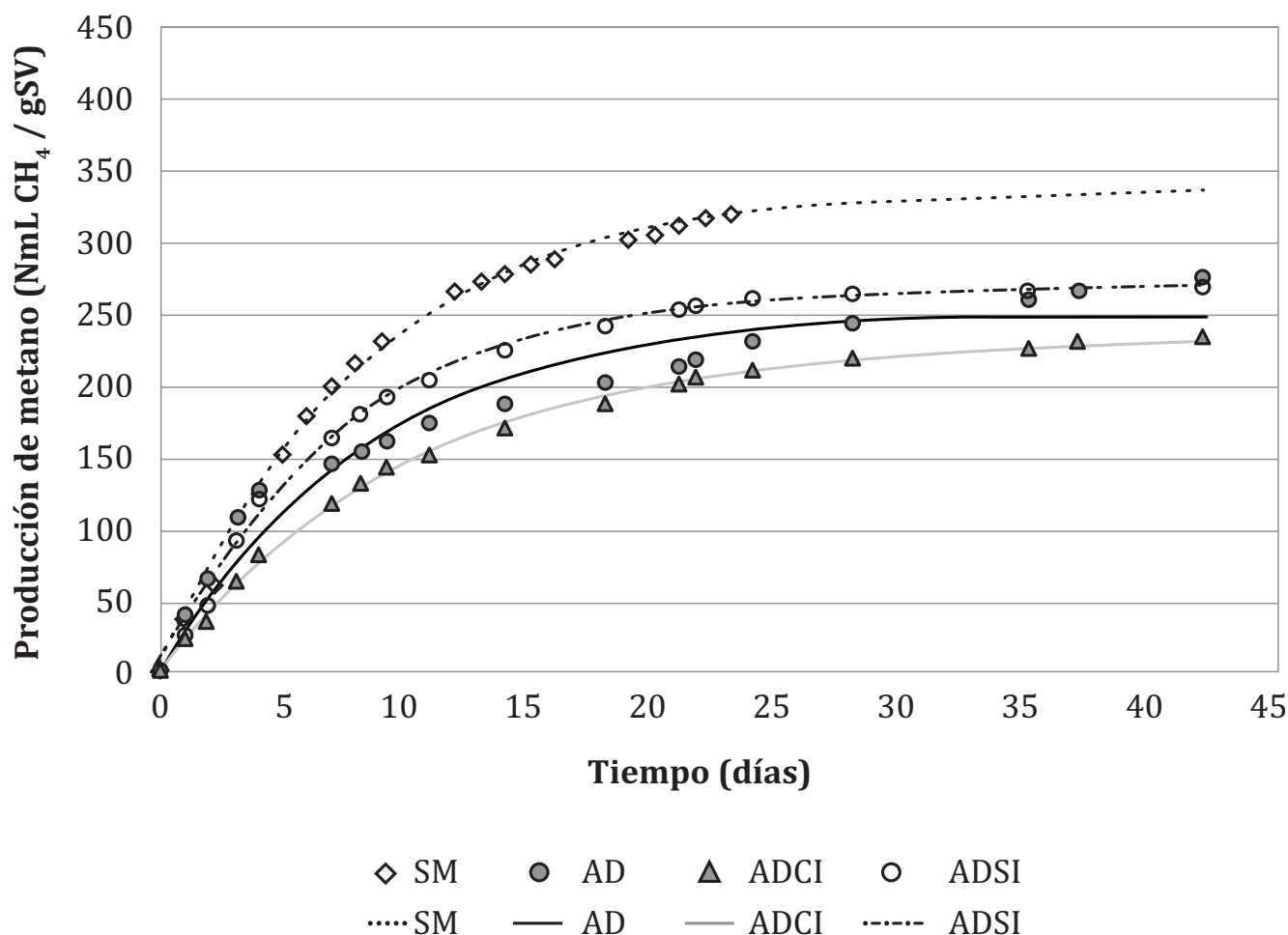
Biomasa	L ₀ (NmL CH ₄ /g SV)	kk (d ⁻¹)	R ²	RMSE
AD	253.00 ± 18.4 ^a	0.12192 ± 0.0269 ^a	0.9556	17.280
AD _{ci}	233.6 ± 4.1 ^a	0.0992 ± 0.0049 ^a	0.9983	3.248
AD _{si}	269.4 ± 5.3 ^a	0.1338 ± 0.0086 ^a	0.9967	5.378
SM	337.2 ± 10.1 ^b	0.1262 ± 0.0101 ^a	0.9964	6.232
<i>p-value</i>	0.01	0.4966		

Valores seguidos por la misma letra en la misma línea no presentan diferencias significativas a p-value <0.05.

El coeficiente de correlación observado para todas las muestras resultó superior al 95% lo que indica que el modelo propuesto resulta adecuado para representar el comportamiento de la producción de metano de AD, y permite obtener los parámetros cinéticos del proceso.

En la Figura 3 se observa la bondad del ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de primer orden y también el efecto no significativo del ensilado sobre la productividad de metano de las muestras de AD.

Figura 3. Producción de metano experimental y ajustado según el modelo cinético de primer orden.



Los resultados aquí observados, tanto en función del potencial máximo como de la velocidad de producción de biometano, demuestran la capacidad de este cultivo perenne para generar biometano. Si bien se observaron deficiencias en la calidad del ensilado de AD como resultado de un elevado contenido de humedad y baja concentración de carbohidratos solubles, a futuro se estudiará el comportamiento de ensilados mixtos de AD-SM con la finalidad de evaluar su efecto sobre el PBM y la factibilidad de un futuro y paulatino reemplazo del SM en los digestores anaeróbicos. Para alcanzar esto será necesario, además, difundir la capacidad de AD como cultivo energético, introducir a productores de determinadas regiones en su

cultivo y acondicionamiento y sensibilizar a los sectores de producción de biogás en la posibilidad de incorporar esta biomasa con potencial de biometano comprobado. Este reemplazo evitaría comprometer el uso de la tierra para la producción de alimentos, ya que AD puede implantarse tanto en suelos arcillosos pesados como en arenas sueltas con regímenes pluviométricos anuales inferiores a 550 mm (Rodríguez et al., 2021), lo que permitiría su cultivo en diferentes áreas marginales de Argentina (Falasca et al., 2011), lo cual contrasta con la alta demanda de agua, fertilizantes químicos y pesticidas que requiere el cultivo maíz para alcanzar una elevada productividad de materia seca (Baldini et al., 2017).

En términos más generales, si bien son reconocidas las ventajas que los biocombustibles representan en la sustitución de combustibles fósiles por la disminución de GEIs, las políticas de promoción de su producción han dejado algunas cuestiones sin resolver, como por ejemplo su incidencia en el desarrollo rural y la necesidad de mayor investigación sobre el impacto en la sostenibilidad del modelo (Sili & Dürr, 2022). Además, numerosos estudios han evidenciado la influencia que el desarrollo de una política de promoción de biocombustibles en base a maíz, ha ejercido sobre el alza de precios del mercado de granos ya sea por la mayor demanda de semillas, como por la competencia de tierras arables entre diferentes cultivos (OECD-FAO, 2007). En Argentina, como en muchos otros países latinoamericanos, la producción de biocombustibles se concentra a base de soja, maíz y caña de azúcar, no explotando suficientemente otros cultivos, que presenten bajas inversiones y pueden tener efectos positivos e impactos N/ten el desarrollo local (Trigo et al., 2013). AD por su parte, como cultivo lignocelulósico perenne, es considerado una de las especies más promisorias para la producción de biomasa en Europa, lo que constituye un antecedente para evaluar el desarrollo de su cadena de valor en Argentina. Los resultados preliminares obtenidos en el presente trabajo se consideran potencialmente atractivos para avanzar en su implementación como cultivo energético.

CONCLUSIONES

El estudio de AD como una biomasa de segunda generación demostró su aptitud como cultivo energético para la producción de biometano con adecuado comportamiento durante el proceso de digestión anaeróbica a escala laboratorio, tanto de la biomasa fresca, como de la ensilada, a pesar de su alto contenido en componentes estructurales. Su productividad energética superior a $5,800 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$ refleja un futuro promisorio para su utilización como sustrato en la producción de biogás, basado en el elevado

rendimiento en materia seca obtenido en la zona centro de la provincia de Buenos Aires ($23.8 \pm 3.5 \text{ t/ha MS}$ en secano y $38.6 \pm 2.4 \text{ t/ha MS}$ en condiciones potenciales para el tercer ciclo de crecimiento), a pesar, de haber observado para esta biomasa un potencial experimental de metano menor al obtenido por el maíz. Los resultados preliminares del presente estudio proveen una alternativa para pensar una transición energética sostenible que incorpore nuevas fuentes de biomasa a la cadena de producción de biogás, que no compitan con la producción de alimentos. Dada la disponibilidad de capacidades e infraestructura vinculada al sector agrícola que tiene Argentina, el paso siguiente será realizar una valoración integral del desarrollo de la cadena de valor de AD bajo una perspectiva multicriterio que incluya además de los costos económicos, la identificación de los impactos sociales y ambientales que se puedan generar en diversos sectores. Este escenario posiblemente permitiría liberar tierras agrícolas para la generación de productos de mayor valor agregado que aporten desarrollo e innovación a la bioeconomía nacional. ■

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SECAT (UNCPBA) Programa de Fortalecimiento a la Ciencia y la Tecnología en las Universidades Nacionales (IV) y a la Facultad de Ingeniería (UNCPBA) por la Beca BICT de la alumna Romina Cardoso. A los integrantes del PEIDYT Torres A., Caldentey F., Portela G., Ressia J., Grosso J. y Bongiorno C. por las tareas de campo y la confección de los microsilos y a Bioeléctrica General Alvear por el aporte de silajes de maíz.

REFERENCIAS

- Andrade, F. (2023). Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz (F. Andrade, M. E. Otegui, A. Cirilo, & S. Uhart (eds.); 1a ed.). <https://sites.google.com/agro.uba.ar/libroecofisiologadelcultivodem/inicio>
- AOAC. (1998). Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society.
- APHA. (1999). APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC. (Issue 1). American Public Health Association.
- Aquino, S., Chernicharo, C., Foresti, E., Dos Santos, M. & Monteggia, L. (2007). Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (ame) em lodos anaeróbios. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 12(2), 192–201.
- ASTM. (1999). Annual Book of ASTM Standards. In American Society for Testing and Materials Annual. ASTM bulletin West Conshohocken.
- Baldini, M., da Borso, F., Ferfuaia, C., Zuliani, F. & Danuso, F. (2017). Ensilage suitability and bio-methane yield of *Arundo donax* and *Miscanthus × giganteus*. *Industrial Crops and Products*, 95, 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.031>
- Bisang, R. & Trigo, E. (2017). Bioeconomía argentina: modelos de negocios para una nueva matriz productiva. Documento Elaborado En El Marco Del Convenio de Colaboración Entre El Ministerio de Agroindustria de La Nación y La Bolsa de Cereales de Buenos Aires., 55.
- Cárdenas Medina, J., Solorio Sánchez, F. & Sandoval Castro, C. (2004). Ensilaje de forrajes: alternativa para la alimentación de rumiantes en el trópico (Universida).
- Chew, K. R., Leong, H. Y., Khoo, K. S., Vo, D. V. N., Anjum, H., Chang, C. K. & Show, P. L. (2021). Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 2921–2939. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01220-z>
- Christou, M., Alexopoulou, E., Cosentino, S. L., Copani, V., Nogues, S., Sanchez, E., Monti, A. & Walter Zegada-Lizarazu, Luigi Parí, A. S. (2018). Giant Reed: From Production to End Use. In E. Alexopoulou (Ed.), *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts: Production, Uses, Sustainability and Markets for Giant Reed, Miscanthus, Switchgrass, Reed Canary Grass and Bamboo* (Vol. 4, Issue 1, pp. 64–75).
- Córdoba, V., Ibarlucía, D. & Santalla, E. (2022). Desarrollo y validación de un mecanismo para remover CO₂ y cuantificar la producción de CH₄ en sistemas de digestión anaeróbica. *RedBioLAC*, 6(1), 40–45.
- Córdoba, V., Manzur, A. & Santalla, E. (2022a). Drying Kinetics and Mathematical Modelling of *Arundo donax* L. Canes, a Potential Renewable Fuel. *Research in Agricultural Engineering*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.17221/73/2021-RAE>
- Córdoba, V., Manzur, A. & Santalla, E. (2022b). Thermal Behaviour and Emission Characteristics of *Arundo donax* L. as Potential Biofuel. *Bioenergy Research*, 1. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10556-5>
- Corno, L., Pilu, R., Cantaluppi, E. & Adani, F. (2016). Giant cane (*Arundo donax* L.) for biogas production: The effect of two ensilage methods on biomass characteristics and biogas potential. *Biomass and Bioenergy*, 93, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.017>
- D'Imporzano, G., Pilu, R., Corno, L. & Adani, F. (2018). *Arundo donax* L. can substitute traditional energy crops for more efficient, environmentally-friendly production of biogas: A Life Cycle Assessment approach. *Bioresource Technology*, 267, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.053>
- Di Girolamo, G., Grigatti, M., Barbanti, L. & Angelidaki, I. (2013). Effects of hydrothermal pre-treatments on Giant reed (*Arundo donax*) methane yield. *Bioresource Technology*, 147, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.006>
- Dirección Nacional de Agricultura. (2023). Estimaciones Agrícolas. <https://Datosestimaciones.Magyp.Gob.Ar/Reportes.Php?Reporte=Estimaciones>.

- Falasca, S., Flores Marco, N. & Galvani, G. (2011). ¿Puede Usarse Una Especie Invasora Como Arundo Donax (Caña Común) Con Fines Energéticos En Argentina? *Inta, N° Doc BC-*, 6. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_arundo_donax_con_fines_energeticos_en_argentin.pdf
- FAO. (2019). Relevamiento nacional de biodigestores, Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico.
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters* (M. H. Gerardi (ed.); 1st ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffiere, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernandez, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., de Lacroix, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 1–9. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Jámbor, A. & Török, Á. (2019). The economics of Arundo donax-A systematic literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154225>
- Kering, M., Butler, T., Biermacher, J. & Guretzky, J. A. (2012). Biomass yield and nutrient removal rates of perennial grasses under nitrogen fertilization. *BioEnergy Research*, 5(1), 61–70.
- Kleinschmit, D. & Kung L, J. (2006). A meta-analysis of the effects of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of corn and grass and small-grain silages. *Journal of Dairy Science*, 89(10), 4005–4013. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72444-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72444-4)
- Kreuger, E., Prade, T., Escobar, F., Svensson, S. E., Englund, J. E. & Björnsson, L. (2011). Anaerobic digestion of industrial hemp-Effect of harvest time on methane energy yield per hectare. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 893–900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.005>
- Li, K., Liu, R. & Sun, C. (2015). Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations. *Bioresource Technology*, 198, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.151>
- Liebetrau, J., Baier, U., Wall, D. & Murphy, J. D. (2020). Integration of biogas systems into the energy system (J. . Murphy (ed.); Issue 8). IEA Bioenergy Task 37.
- Mantineo, M., D'Agosta, G. M., Copani, V., Patané, C., Cosentino, S. L., Mantineo, M., D'Agosta, G. M., Copani, V., Patané, C. & Cosentino, S. L. (2009). Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 114(2), 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.020>
- Monlau, F., Barakat, A., Trably, E., Dumas, C., Steyer, J. P. & Carrère, H. (2013). Lignocellulosic materials into biohydrogen and biomethane: Impact of structural features and pretreatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(3), 260–322. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.604258>
- Nogar, A. G., Rodríguez, L. D., Bongiorno, C.-V. & Santalla, E. M. (2021). Las potencialidades bioenergéticas del Arundo donax L. en Argentina. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 30, 84–104. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.30.2021.4607>
- OECD-FAO. (2007). *AGRICULTURAL OUTLOOK 2007-2016* (pp. 1–88).
- Pirozzi, D., Fiorentino, N., Impagliazzo, A., Sannino, F., Yousuf, A., Zuccaro, G. & Fagnano, M. (2015). Lipid production from Arundo donax grown under different agronomical conditions. *Renewable Energy*, 77(September 2020), 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.046>
- Pompeiano, A., Guglielminetti, L., Bargiacchi, E. & Miele, S. (2013). Responses in chemical traits and biomass allocation of Arundo donax L. to deficit resources in the establishment year. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(December), 377–384. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392013000400008>
- Ragolini, G., Dragoni, F., Simone, M. & Bonari, E. (2014). Suitability of giant reed (Arundo donax L.) for anaerobic digestion: Effect of harvest time and frequency on the biomethane yield potential. *Bioresource Technology*, 152, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.004>

- Rodríguez, D., Lázaro, L., Ressia, J., Laddaga, J., Grosso, J., Bongiorno, C. & Confalone, A. (2021). Producción de biomasa de Arundo donax L., un cultivo bioenergético para el centro de la provincia de Buenos Aires. *Revista Argentina de Agrometeorología-RADA*, XII, 15–20.
- Schievano, A., Corno, L., Adani, F. & Pilu, S. R. (2012). Più biogas a costi inferiori con arundo o doppia coltura. *Settore AGR/13 - Chimica Agraria*.
- Scott, A. & Blanchard, R. (2021). The role of anaerobic digestion in reducing dairy farm greenhouse gas emissions. *Sustainability (Switzerland)*, 13(5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13052612>
- Sili, M. & Dürr, J. (2022). Bioeconomic Entrepreneurship and Key Factors of Development: Lessons from Argentina. *Sustainability*, 14(4), 2447. <https://doi.org/10.3390/su14042447>
- Steinmetz, R. L. R., Mezzari, M. P., da Silva, M. L. B., Kunz, A., do Amaral, A. C., Tápparo, D. C. & Soares, H. M. (2016). Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. *Bioresource Technology*, 219, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.031>
- Technical Association of Pulp and Paper Industry - TAPPI. (1999). T 203 cm-99. Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. *TAPPI Test Methods*, 5–9.
- Thomsen, S. T., Spliid, H. & Østergård, H. (2014). Statistical prediction of biomethane potentials based on the composition of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 154, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.029>
- Trigo, E. J., Henry, G., Sanders, J., Schurr, U., Ingelbrecht, I., Revel, C., Santana, C. & Rocha, P. (2013). Towards bioeconomy development in Latin America and the Caribbean. In *Towards a Latin America and Caribbean knowledge based bioeconomy in partnership with Europe* (pp. 15–41). Pontificia Universidad Javeriana. www.bioeconomy-alcue.org
- Triolo, J. M., Pedersen, L., Qu, H. & Sommer, S. G. (2012). Biochemicalmethanepotentialandanaerobicbiodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource Technology*, 125, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.079>
- Triolo, J. M., Sommer, S. G., Møller, H. B., Weisbjerg, M. R. & Jiang, X. Y. (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*, 102(20), 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.026>
- USEPA. (1995). Test Methods for Evaluating solid waste, SW-846, Method 9040C, Soil and waste pH (Issue November, pp. 1–5). <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/index.htm>
- Veluchamy, C., Gilroyed, B. H. & Kalamdhad, A. S. (2019). Process performance and biogas production optimizing of mesophilic plug flow anaerobic digestion of corn silage. *Fuel*, 253(May), 1097–1103. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.104>
- Webster, J. (1992). *The Biochemistry of Silage* (Second Edition). By P. McDonald, A. R. Henderson and S. J. E. Heron. Marlow, Bucks, UK: Chalcombe Publications, (1991), pp. 340, £49.50, ISBN 0-948617-225. *Experimental Agriculture*, 28(1), 125–125. <https://doi.org/10.1017/S0014479700023115>
- Webster, R. J., Driever, S. M., Kromdijk, J., McGrath, J., Leakey, A. D. B., Siebke, K., Demetriades-Shah, T., Bonnage, S., Peloe, T., Lawson, T. & Long, S. P. (2016). High C3 photosynthetic capacity and high intrinsic water use efficiency underlies the high productivity of the bioenergy grass Arundo donax. *Scientific Reports*, 6, 20694. <https://doi.org/10.1038/srep20694>
- Yemm, E. W. & Willis, A. (1954). The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal*, 57(3), 508.